

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRÁCTICAS DE LABORATORIO

TECNOLOGÍA DE MATERIALES Y MANUFACTURA (IN324)

GUÍA DE LABORATORIO # 3

"METROLOGÍA DIMENSIONAL"

Profesores:

Jorge Perleche Castañeda

Ernesto Tello Suárez

2024

1. OBJETIVO

a) Objetivo general

- Aprender a medir y conocer los principios de la metrología dimensional utilizando instrumentos básicos de medición.

b) Objetivos específicos

- Aprender los fundamentos de la metrología y del SI.
- Conocer las funciones básicas de la Dirección de Metrología del INACAL.
- Conocer la importancia de la metrología dimensional en las especificaciones del diseño de un producto (dimensiones, tolerancias y acabado superficial).
- Realizar mediciones dimensionales (magnitudes lineales y angulares).
- Usar instrumentos de medición como el vernier, el micrómetro y el goniómetro.
- Aprender las nuevas técnicas que usa la metrología dimensional moderna.

2. MARCO TEÓRICO

a) Metrología[1]

La **metrología** es la ciencia cuyo objeto es el estudio de los sistemas de pesas y medidas, los sistemas de unidades adoptados y los instrumentos utilizados para actualizarlos e interpretarlas. La metrología cubre tres importantes actividades:

- La definición de las unidades de medida internacionalmente aceptadas.
- La realización de las unidades de medida por métodos científicos, por ejemplo, la realización del metro mediante el empleo del láser estabilizado[2].
- El establecimiento de las cadenas de trazabilidad, determinando y documentando el valor y exactitud de una medición y diseminando dicho conocimiento.

Un servicio nacional de metrología cubre la metrología: científica, industrial y legal.

La **metrología científica** se encarga de la posesión, mantenimiento y custodia de los patrones nacionales de los sistemas equivalentes para todas las unidades de medida legales en el país. Asimismo, persigue el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades de base y derivadas del sistema internacional de unidades (SI).

La **metrología industrial** se encarga de la calibración, control y mantenimiento de los equipos de medición empleados en producción, inspección y pruebas. Garantiza que los productos estén de conformidad con normas. La metrología industrial está a lo largo de la cadena de valor (calidad total).
La **metrología legal** es el campo reglamentado por el Estado para coadyuvar en la protección del consumidor y de toda la sociedad. La metrología legal se da en el momento de la transacción del producto final al consumidor.

[1] Restrepo, Jaime
[2] Los láseres estabilizados "constituyen la realización primaria del metro en la mayoría de Institutos Nacionales de Medidas y son utilizados como patrones de frecuencia óptica para calibrar, por comparación, otras fuentes de radiación". (Álvarez 2006: 92). "Hoy una medición de exactitud extrema se basa en la velocidad de la luz en el vacío, la cual se calcula multiplicando la longitud de onda del haz infrarrojo estandarizado de un rayo láser por su frecuencia" (Kalpakjian 2014: 1009).

Así, por ejemplo, los **instrumentos de medición sujetos a control metrológico** son los usados para realizar transacciones comerciales o determinar el precio de servicios; para remunerar o estimar en cualquier forma labores profesionales; los requeridos para prestar servicios públicos domiciliarios; para realizar actividades que puedan afectar la vida, la salud o la integridad física, la seguridad nacional o el medio ambiente; para ejecutar actos de naturaleza pericial, judicial, administrativa; para evaluar la conformidad de productos y de instalaciones; para determinar cuantitativamente los componentes de un producto.

b) Sistema Internacional de Unidades (SI)[3]

El **SI** es el conjunto sistemático y organizado de unidades, adoptado convencionalmente en octubre de 1960 en la undécima Conferencia de Pesas y Medidas, como el sistema universal de unidades para poner fin al caos generado por la dispersión de diferentes sistemas. Las principales características del SI son:

- Está basado en el sistema métrico decimal.
- Es coherente, ya que las unidades derivadas se obtienen por productos o cocientes de las unidades básicas.
- Es universal.
- Es unívoco, para cada magnitud existe una sola unidad SI.
- El factor para obtener las unidades derivadas a partir de las básicas es siempre 1.
- Las unidades básicas del SI están definidas en experimentos físicos que se pueden efectuar en el laboratorio, sin recurrir al prototipo o patrón.
- Emplea prefijos para designar los múltiplos de las unidades.

Unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI)

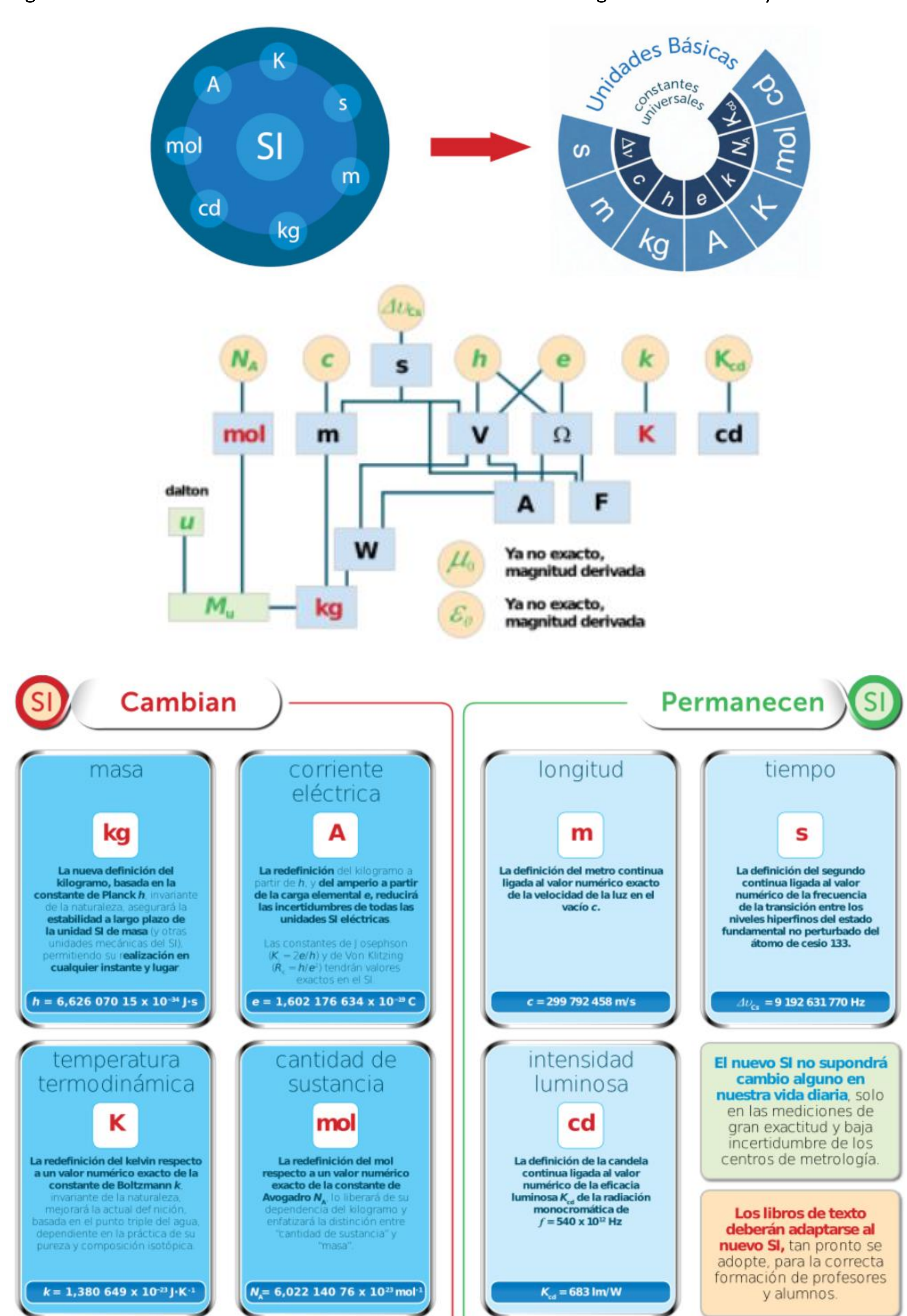
El SI se desarrolla en base a un pequeño número de unidades bien definidas que corresponden a ciertas magnitudes fundamentales (longitud, masa, tiempo, etc.) que se conocen como **unidades básicas** del SI.

Unidades básicas del SI

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Intensidad de corriente eléctrica	ampére	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

A partir del 2018 hay un nuevo Sistema Internacional de Unidades basado en los valores de 7 constantes universales. Un nuevo SI para el siglo XXI.[4]

[3] Restrepo, Jaime
[4] Centro Español de Metrología (CEM), 2018



Unidades que permanecen

Unidad de longitud. El **metro** (m) es la longitud de trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un tiempo de 1/299 792 458 de segundo. La nueva definición del

metro, en vez de estar basada en la barra de platino o en única fuente de luz, está abierta a cualquier otra radiación cuya frecuencia sea conocida con exactitud.

Unidad de tiempo. El **segundo** (s) es la duración 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

Unidad de intensidad luminosa. La **candela** (cd) es la unidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hertz y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 watt por estereorradián.

Unidades que cambian

Unidad de masa. La nueva definición del **kilogramo** (kg) basada en la constante de Planck h ($h = 6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J.s), invariante de la naturaleza, asegurará la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa (y otras unidades mecánicas del SI), permitiendo su realización en cualquier instante y lugar.

Unidad de intensidad de corriente eléctrica. La redefinición del **amperio** (A) a partir de la carga elemental e[5] ($e = 1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C), reducirá las incertidumbres de todas las unidades SI eléctricas.

Unidad de temperatura termodinámica. La redefinición del **kelvin** (K) respecto a un valor numérico exacto de la constante de Boltzmann k ($k = 1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ $J.K^{-1}$), invariante de la naturaleza, mejorará la actual definición basada en el punto triple del agua, dependiente en la práctica de su pureza y su composición isotópica.

Unidad de cantidad de sustancia. La redefinición del **mol** (mol) respecto a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro N_A ($N_A = 6{,}022\ 140\ 76 \times 10^{-23}$ mol^{-1}), lo liberará de su dependencia del kilogramo y enfatizará la distinción entre "cantidad de sustancia" y masa.

Por otro lado, las **unidades derivadas sin dimensión** del SI se forman por medio de combinaciones de las unidades básicas, según las relaciones que ligan las magnitudes correspondientes a dichas unidades.

Unidades derivadas sin dimensión del SI

Magnitud	Nombre	Símbolo	Expresión en unidades SI básicas
Ángulo plano	Radián	rad	$mm^{-1} = 1$
Ángulo sólido	Estereorradián	sr	$m^2m^{-2} = 1$

Unidad de ángulo plano. El **radián** (rad) es el ángulo plano comprendido entre dos radios de un círculo sobre cuya circunferencia interceptan un arco de longitud igual a la del radio.

Unidad de ángulo sólido. El **estereorradián** (sr) es el ángulo sólido que, teniendo su vértice en el centro de una esfera, intercepta sobre la superficie de dicha esfera un área igual a la de un cuadrado que tenga por lado el radio de la esfera.

[5] Carga elemental o carga del electrón es la constante física que corresponde a la unida mínima e indivisible de carga eléctrica: todas las cargas observables son un múltiplo entero de esta carga.

También, hay **unidades del SI derivadas** que se expresan a partir de las unidades SI básicas y suplementarias. Por ejemplo, la unidad de superficie metro cuadrado (m^2) o la unidad de velocidad, un metro por segundo (m/s o $m \cdot s^{-1}$). Asimismo, otras unidades han recibido un nombre especial como la unidad de presión pascal (Pa).

De igual forma, se admite el empleo preferencial de ciertas combinaciones o ciertos nombres especiales, con el fin de facilitar la distinción entre magnitudes que tengan las mismas dimensiones. Por ejemplo, la unidad de frecuencia hertz (Hz) se emplea con preferencia al segundo a la potencia menos uno (s^{-1}), y para el momento de fuerza se prefiere el newton metro (N · m) al joule (J). Finalmente, hay unidades que son ampliamente utilizadas en la vida cotidiana y cada una de ellas tiene una definición exacta en unidades SI y cuyo uso con el SI está aceptado. Se muestra a continuación en el siguiente cuadro dichas unidades.

Unidades no pertenecientes al SI
cuyo uso es aceptado por el SI y están autorizadas[6]

Magnitud	Nombre	Símbolo	Relación
Ángulo plano	Grado	°	(π/180) rad
	Minuto	’	(π/10800) rad
	Segundo	”	(π/648000) rad
Tiempo	Minuto	min	60 s
	Hora	h	3600 s
	Día	d	86400 s
Volumen	Litro	L o L	1 dm^3 = 10^{-3} m^3
Masa	Tonelada	t	10^3 kg
Área	Hectárea	ha	10^4 m^2

Prefijos. Los símbolos de las unidades pueden verse afectados por prefijos que actúan como múltiplos o submúltiplos decimales. Estos prefijos se ponen delante del símbolo de la unidad correspondiente sin espacio intermedio. El conjunto del símbolo más el prefijo equivale a una nueva unidad que puede combinarse con otras unidades y elevarse a cualquier exponente (positivo o negativo).

Prefijos decimales

Múltiplos decimales		
Prefijo	**Símbolo**	**Factor**
deca	da	10^1
hecto	h	10^2
kilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}
zetta	Z	10^{21}
yotta	Y	10^{24}
Submúltiplos decimales		
Prefijo	**Símbolo**	**Factor**
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}

[6] Franco, Ángel

mili	m	10^{-3}
micro	µ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yocto	y	10^{-24}

c) Instituto Nacional de Calidad (INACAL)[7]

En el país, el **Instituto Nacional de Calidad (INACAL)**, a través de su Dirección de Metrología representa al Perú a nivel internacional en este campo y a nivel nacional rige la Metrología en los campos científico, industrial y legal.

En **metrología científica** el INACAL entre otras funciones debe: establecer, custodiar y ampliar la colección de los patrones nacionales de medición, garantizar su referencia periódica a patrones de rango superior y asegurar su trazabilidad internacional, conforme a lo dispuesto en las recomendaciones de los organismos internacionales en la materia.

Trazabilidad[8]

Por ejemplo, la **trazabilidad de las mediciones de masa** en el país se brinda por medio del **Patrón Nacional de Masa (KP1)**, cuyo material es de acero inoxidable austenítico, el cuál ha sido calibrado en el Instituto Nacional de Metrología de la República Federal de Alemania, el **PTB** y siendo trazable al **Prototipo Internacional del kilogramo,** el **IPK**.



Fig. 2 Trazabilidad y jerarquía de los patrones

La transferencia-trazabilidad de la unidad de masa del **Patrón Nacional de Masa** se da primero a los patrones de referencia de acero inoxidable y estas a los patrones de trabajo del Laboratorio de Masas. La trazabilidad y la incertidumbre

[7] INACAL 2015
[8] "Según el vocabulario internacional de metrología, la trazabilidad es la propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, en virtud de la cual dicho resultado se puede relacionar con referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas las incertidumbres determinadas" (Restrepo 2016: 122).

están estrechamente ligadas al proceso y al mensurando[9]; así, la incertidumbre en la medición crece mientras más larga es la cadena de trazabilidad.[10]



Fig. 1 Patrón Nacional de Masa (KP1) y su testigo (KP2)

PATRÓN NACIONAL DE MASA

(Resolución N° 004-2016-INACAL/DM publicada el 2016-12-31)

En **metrología industrial** el INACAL entre otras funciones debe: realizar calibraciones y verificaciones de los instrumentos de medición y verificar los patrones secundarios.



En **metrología legal** el INACAL entre otras actividades debe: difundir el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú; emitir Certificaciones Metrológicas como: Certificación de Aprobación de Modelo de Medidores de Agua, Medidores de Gas, Medidores de Energía Eléctrica, y Termómetros Clínicos; elaborar Normas Metrológicas Peruanas (NMP) sobre instrumentos de medición empleados en transacciones comerciales, salud y seguridad.[11]

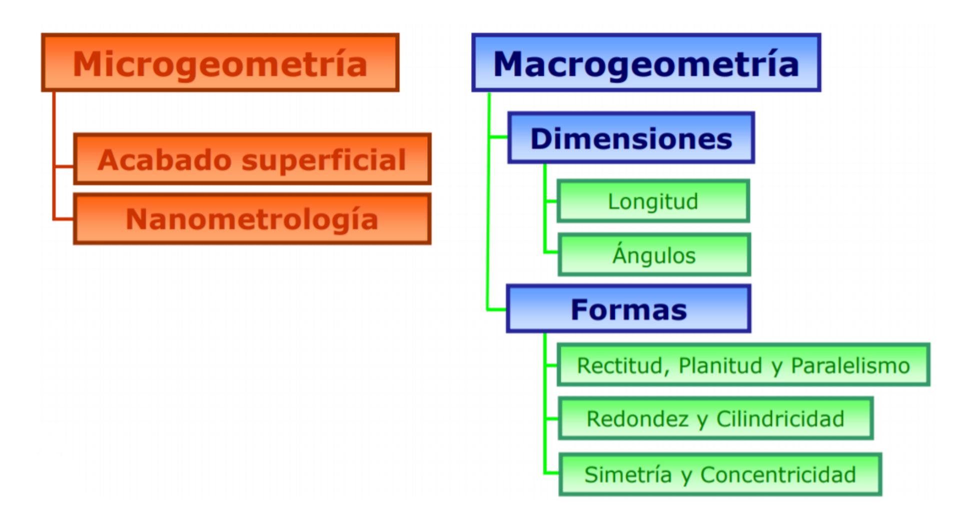
d) Metrología Dimensional

La **metrología dimensional** estudia la medición de magnitudes geométricas: dimensiones (longitudes y ángulos), formas (planitud, cilindricidad, etc.) y acabado superficial (rugosidad). La metrología dimensional permite **verificar la producción** (tolerancias y acabados de las piezas que se fabrican) y **verificar el estado de las máquinas** (alineación de máquinas herramientas y calibración de máquinas).[12]

---

[9] El mensurando de la medición se refiere al objeto que se está midiendo o calculando sus mediciones.
[10] INACAL s/f "Patrón Nacional de Masa"
[11] INACAL s/f "Dirección de Metrología (INACAL-DM)"
[12] Universidad del País Vasco, Tema 15

Así, atendiendo al tipo de mediciones a realizar o de defectos a evaluar la metrología dimensional se puede clasificar como:[13]



Por otro lado, las **propiedades geométricas de una pieza fabricada van a tener desviaciones a la geometría ideal de la pieza** con unos valores nominales que se ajustan a unas formas determinadas: esferas, cilindros, rectas, planos, etc. Por lo tanto, estas desviaciones pueden clasificarse en desviaciones de: tamaño, forma, orientación, ondulación y rugosidad. Así, por ejemplo, **las desviaciones de forma son las desviaciones entre la forma real y el elemento geométrico ideal**.

Entonces debido a la imposibilidad de fabricar piezas perfectas sin desviaciones a sus valores nominales, los diseños de fabricación deben acompañarse de las tolerancias: tamaño, forma, ondulación, rugosidad.[14]

Por lo tanto, cuando fabricamos una pieza sus dimensiones no se pueden dar de forma exacta siendo necesario dar un intervalo (**tolerancia dimensional**)[15].

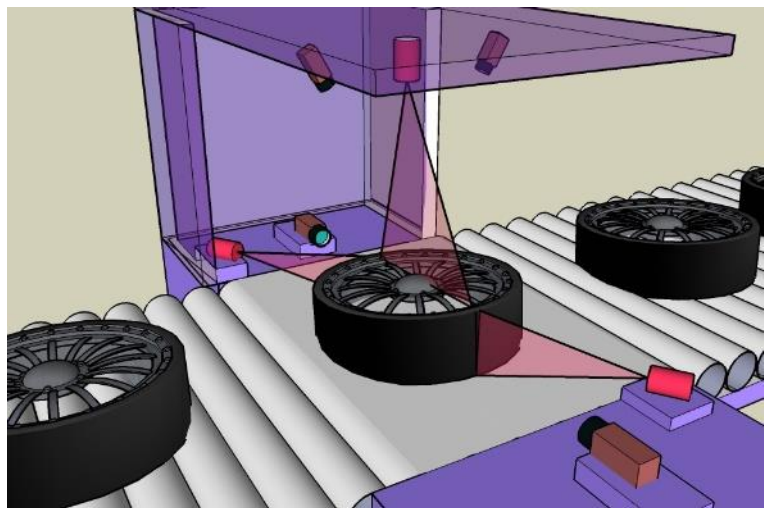
Finalmente, la finalidad básica de las mediciones dimensionales en la producción es garantizar y verificar la concordancia del producto fabricado con sus especificaciones de diseño. La **necesidad actual de una mayor exactitud en las mediciones** procede de la mayor precisión requerida en la fabricación, debido a **nuevas exigencias**:[16]

- Tolerancias de fabricación más estrechas.
- Compactación y miniaturización de componentes y productos (microelectrónica).
- Diseño compensado entre fuerzas y tensiones.
- Mayor precisión operacional y mejores prestaciones en engranajes, rodillos, elementos de guiado y sellado, etc., lo que implica tolerancias de posición, y forma geométrica y de calidad superficial más estrechas.
- Ensamblado automático a altas velocidades.
- Intercambiabilidad general de piezas, componentes y repuestos.
- Fiabilidad en el funcionamiento de máquinas y fabricaciones en general.

---

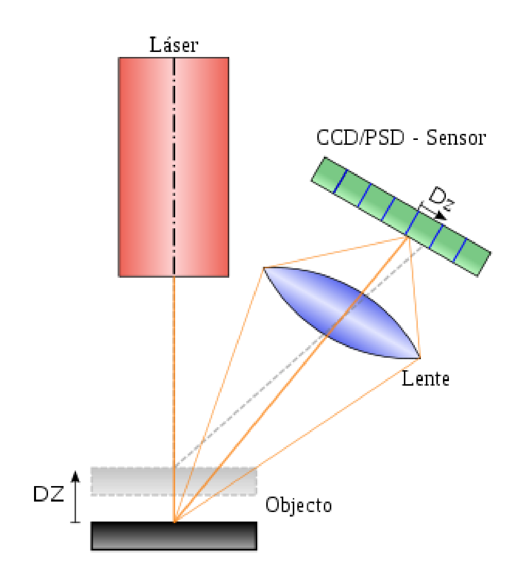
[13] Muñoz, Rafael, Tema 10
[14] Muñoz, Rafael, Tema 10.
[15] Se define la tolerancia dimensional "como la variación permisible o aceptable de dimensiones como altura, ancho, profundidad, diámetro y ángulos de una parte". (Kalpakjian 2014:1022).
[16] Universidad Carlos III de Madrid

Así, actualmente, las mediciones se efectúan en las máquinas de fabricación durante la producción de un producto, pieza o parte; enfoque conocido como **inspección en proceso, en línea o en tiempo real.** Un ejemplo de esto se muestra en la figura con la inspección de llantas en base a triangulación laser.



Inspección de llantas en base a triangulación láser

El **escáner láser de triangulación 3D** es un escáner activo que usa la luz del láser para examinar el entorno. El haz de luz láser incide en el objeto y se usa una cámara para buscar la ubicación del punto del láser. Dependiendo de la distancia a la que el láser golpee una superficie, el punto del láser aparece en lugares diferentes en el sensor de la cámara. **Esta técnica se llama triangulación** porque el punto de láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo. La longitud de un lado del triángulo definido por la cámara y el emisor del láser es conocida. Se sabe también el ángulo del vértice del emisor de láser. El ángulo del vértice de la cámara puede ser determinado mirando la ubicación del punto del láser en la cámara. Estos tres valores permiten determinar el resto de las dimensiones del triángulo, y, por tanto, la posición de cada punto en el espacio.



Principio del sensor láser de triangulación

Otro ejemplo de sensores 3D, que combinan medidas de contorno 2D con medidas 3D usando el principio de triangulación de línea múltiple. Esto permite que se realice una inspección a alta velocidad, una inspección a alta velocidad de

características geométricas complejas en el trabajo de metales y en la fabricación de carrocerías de automóviles.



Inspección automatizada en la fabricación de carrocerías de automóviles

Tolerancias y características geométricas

Las **tolerancias** son importantes debido a su rol crucial en la posibilidad de intercambiar la pieza o parte, el funcionamiento del producto y los costos de manufactura; sin embargo, **cuánto más pequeña sea la tolerancia más elevados serán los costos de producción**. Hay una relación general entre las tolerancias y el tamaño de la parte y entre las tolerancias y el acabado de la superficie de las partes manufacturadas con los distintos procesos de manufactura. Cuanto más grande sea la parte, mayor es el rango de tolerancia asequible.[17] Las **tolerancias surgen en el proceso de diseño de cualquier elemento y determinan el rechazo de los producidos con valores fuera del intervalo de tolerancia**.

Por otro lado, la GD&T (Geometric Dimensional and Tolerancing) o DTG (Dimensiones y Tolerancias Geométricas) es un conjunto de símbolos estandarizados que definen las características de una pieza y sus zonas de tolerancia de fabricación. Tanto los símbolos como su interpretación están regulados por la norma ANSI Y14-5-M-1994 de la American National Standard Institute.[18] Esta simbología es muy usado en dibujos de diseño mecánico para describir de forma explícita la geometría nominal de una pieza o elemento y su variación permitida o tolerancia.

Asimismo, las **características geométricas** más comunes de las partes o piezas que son usados para su dimensionamiento geométrico son:[19]

- **Longitud:** dimensión de una línea o de un cuerpo considerando su extensión en línea recta. Incluye las dimensiones lineales de las partes.
- **Diámetro:** anchura de un objeto con forma circular, cilíndrica o esférica. Incluye los diámetros externos e internos.
- **Profundidad:** distancia entre el fondo de algo y el punto tomado como referencia.

[17] Kalpakjian, Serope
[18] Moro, María
[19] Kalpakjian, Serope

En cuanto a las **tolerancias** estas pueden ser de cinco tipos:[20]

1. **Tolerancia de forma.** Establece la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada implícita en el dibujo.

2. **Tolerancia de orientación.** Define la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar respecto a un dato.

3. **Tolerancia de perfil.** Fija la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada en el dibujo o de un dato.

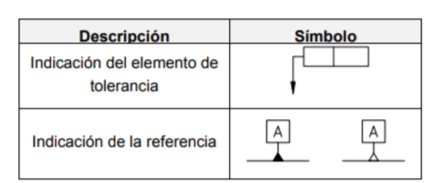
4. **Tolerancia de alabeo o control o variación.** Determina la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada implícita en el dibujo durante una rotación completa (360°) de la pieza sobre un eje establecido.

5. **Tolerancia de posición o localización o situación.** Establece la cantidad permitida que una característica puede variar de la posición perfecta implícita en el dibujo con respecto a otro dato o característica. También, define una zona en la que el eje central puede variar desde la posición real (teóricamente exacta). Las dimensiones básicas establecen la posición real a partir de las características de los datos y entre características interrelacionadas.

En el siguiente cuadro se muestra la lista de tolerancias geométricas, características y símbolos usados según la norma europea UNE 1-121-91.[21]

TIPOS DE TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

	Tipo de tolerancia	Características	Símbolo
Elementos simples (Sin referencia)	De forma	Rectitud	—
		Planitud	⏥
		Redondez	○
		Cilindricidad	⌭
Elementos simples o asociados		Forma de una línea	⌒
		Forma de una superficie	⌓
Elementos asociados. (Con referencia)	- Orientación	Paralelismo	//
		Perpendicularidad	⊥
		Inclinación	∠
	- Situación	Posición (con o sin referencia)	⌖
		Concentricidad /Coaxialidad	◎
		Simetría (Plano)	⌯
	- Alabeo Oscilación	Alabeo Radial.	↗
		Alabeo Axial.	⌰

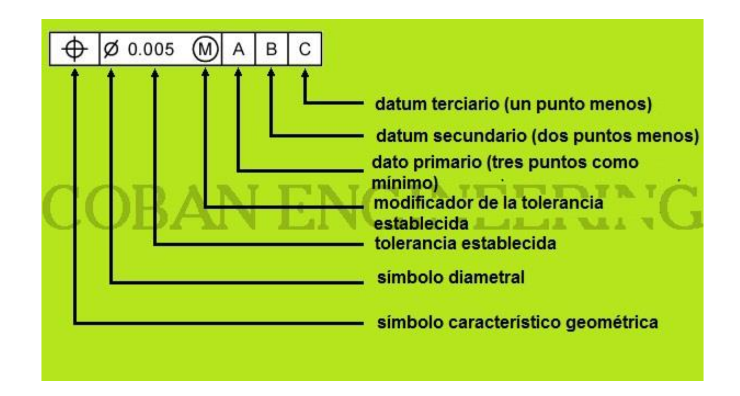


Descripción	Símbolo
Indicación del elemento de tolerancia	
Indicación de la referencia	A A

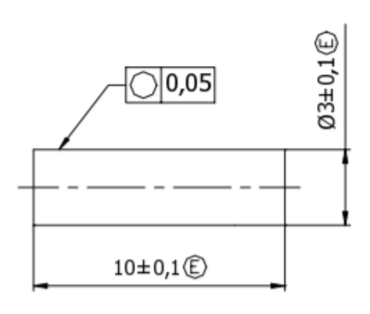
Como se describe en la imagen, la tolerancia se representa en un marco de control que es un símbolo rectangular que contiene indicaciones que definen la tolerancia geométrica de funciones. Además, se indica el tipo de tolerancia, el perfil de la zona

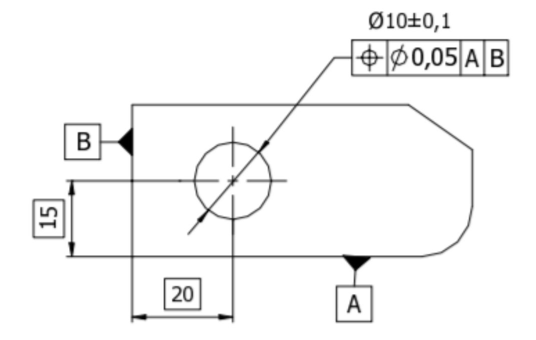
[20] Escamilla, Adolfo
[21] Universidad de Cantabria

de tolerancia, el valor de la tolerancia, el modificador de la condición en la que se aplica la tolerancia y las referencias dato con sus respectivos modificadores.[22]



Se muestran algunos ejemplos de dimensionamiento geométrico y tolerancia.[23]





De acuerdo al acotado de ete plano se pide:
-Que en cualquier punto a lo largo del eje, la forma circular de la sección transveral esté contenida entre dos círculos concéntricos ideale distanciado radialmente 0,05 mm, y que la medida del círculo "escogido" no rebase la cota de tolerancia del diámetro.
-Que el cilindro construido pueda estar contenido en un cilindro recto de forma perfecta con diámetro 3,1 mm y longitud 10,1 mm.

El acotado que se muestra enfatiza que el eje del agujero cilíndrico debe quedar contenido dentro de un cilindro recto de forma perfecta que sea paralelo a la superficie sobre la que descansa la pieza cuando se apoya sobre la cara A; paralelo además, a la superficie determinada por la cara B cuando esta simplemente toca una superficie plana perpendicular a la superficie sobre la que se apoya la cara A.

Por otro lado, las **características geométricas** más comunes de las partes o piezas que son usados en tolerancias geométricas son:[24]

1. En tolerancias de forma

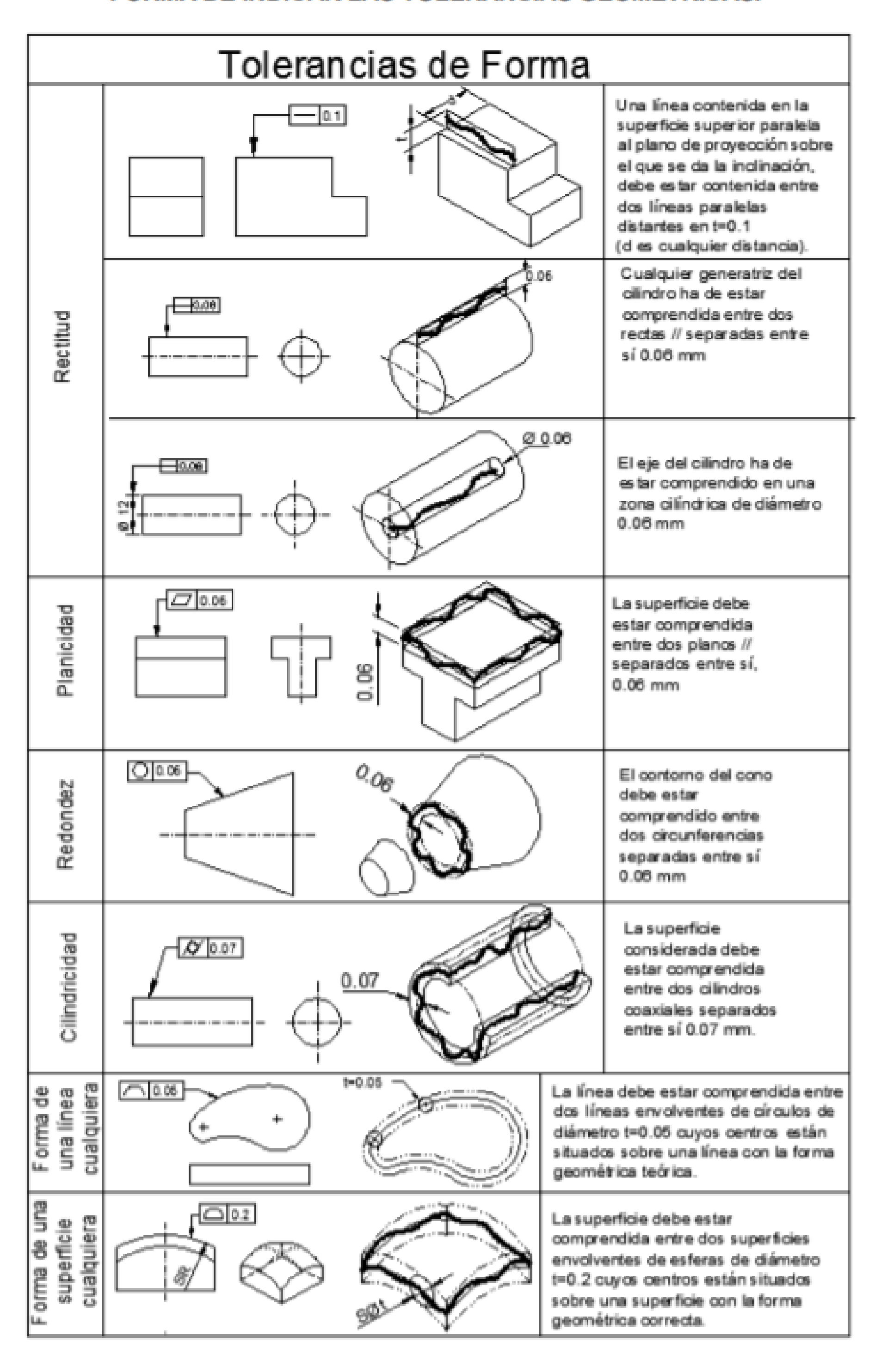
- **Rectitud:** es una condición en la que todos los puntos forman una línea recta. La tolerancia se representa como dos líneas paralelas.
- **Planicidad:** es una condición en la que todos los puntos en una superficie están en un plano. La tolerancia se especifica con dos planos paralelos.
- **Redondez o circularidad:** todos los puntos de una superficie forman un circulo. La tolerancia se especifica con dos planos paralelos.

[22] Coba, Engineering
[23] Gómez, Jorge
[24] Moro, María

- **Cilindricidad:** condición en la que todos los puntos de una superficie son equidistantes a un eje común. Una tolerancia cilíndrica se especifica definida entre dos cilindros concéntricos.

- **Perfil:** es un método de tolerancia para controlar superficies irregulares, líneas, arcos o planos normales. Los perfiles se pueden aplicar a elementos de líneas individuales o a toda la superficie de la pieza.

FORMA DE INDICAR LAS TOLERANCIAS GEOMETRICAS.



2. En tolerancias de posición

- **Paralelismo:** condición de una superficie o eje equidistantes a todos los puntos desde el plano o eje del dato. Esta tolerancia especifica una zona que está definida por dos planos o líneas paralelas al plano o eje del dato o una zona de tolerancia cilíndrica cuyo eje sea paralelo al eje de un dato.

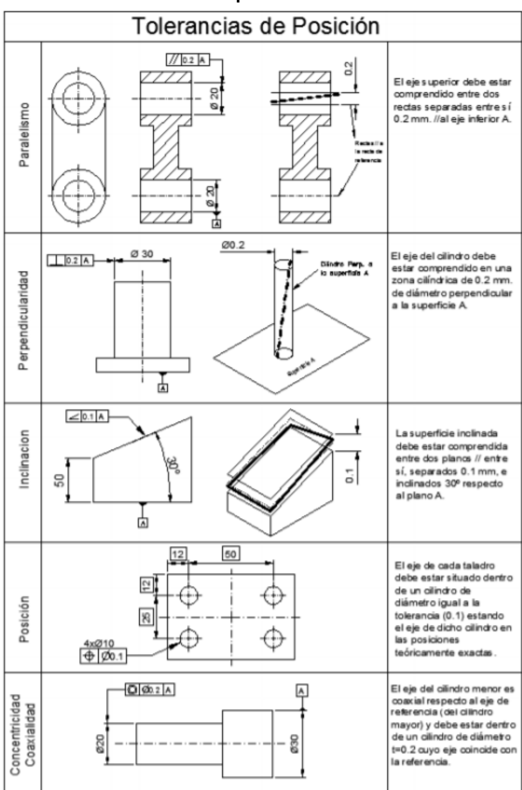
- **Perpendicularidad:** condición de una superficie o eje que forma un ángulo recto con otro plano o eje. Esta tolerancia especifica una zona definida por dos planos perpendiculares al otro plano o eje del dato o una zona definida por dos planos paralelos perpendiculares al eje del dato.

- **Inclinación o angularidad:** condición de una superficie o eje que forma un ángulo específico (aparte de 90°) con otro eje o plano. La zona de tolerancia está definida por dos planos paralelos al ángulo básico específico desde el eje o plano de un dato.

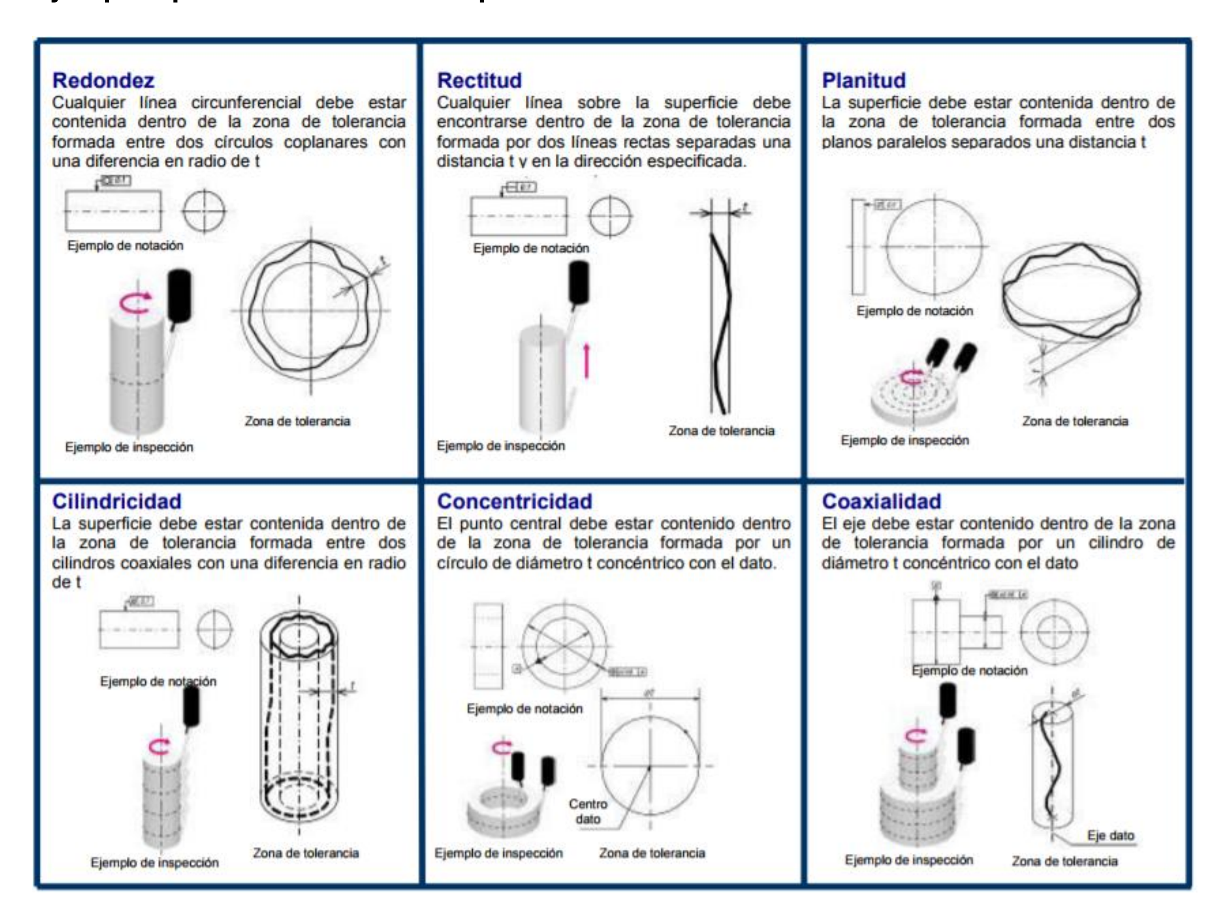
- **Posición:** define una zona en la que el eje central o plano central puede variar desde la posición real. Una tolerancia de posición es la variación total admisible entre la situación de una característica y su situación exacta. Para características cilíndricas como agujeros y diámetros externos, la tolerancia de posición es por lo general, el diámetro de la zona de tolerancia, donde se deben situar los ejes de la característica.

- **Concentricidad:** se refiere a la posición del centro de una circunferencia con respecto al centro de otra circunferencia que sirve de referencia. Los ejes de todos los elementos locales cruzados de una superficie de revolución son comunes a la característica del eje del dato.

- **Coaxialidad:** se refiere a la posición del eje de un cilindro recto con respecto al eje de otro cilindro que sirve de referencia.



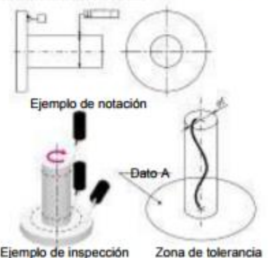
Ejemplos para la medición e inspección de forma[25]





Perpendicularidad

La **línea** o superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos planos separados una distancia t y perpendiculares al dato



Perpendicularidad

La línea o **superficie** debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos planos separados una distancia t y perpendiculares al dato



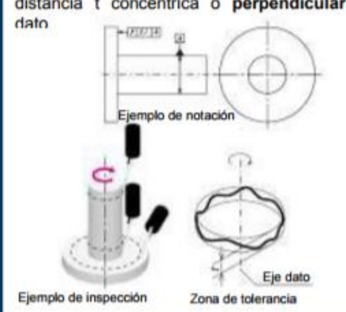
Cabeceo circular

La línea debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos círculos coplanares y/o concéntricos separados una distancia t **concéntrica** o perpendicular al dato



Cabeceo circular

La línea debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos círculos coplanares y/o concéntricos separados una distancia t concéntrica o **perpendicular** al dato



Cabeceo total

La superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos cilindros coaxiales con una diferencia en radio t, o planos separados una distancia t, concéntrica o perpendicular al dato



Cabeceo total

La superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos cilindros coaxiales con una diferencia en radio t, o planos separados una distancia t, concéntrica o perpendicular al dato



[25] Mitutoyo México, 2010

Teoría de errores[26,27]

El error en la medición está clasificado en sistemático y aleatorio.

Error sistemático. Es un componente del error de medición que permanece constante o varía en forma previsible y regular durante cierto número de mediciones de la misma cantidad, es decir está presente en el proceso de medición.

El **error sistemático** es un valor constante que puede estimarse, de manera que el valor medido puede corregirse. Sin embargo, la corrección no es exacta y siempre quedará un error que será similar al error aleatorio. Los errores sistemáticos suelen ser pocos: por ejemplo, equipo mal calibrado, temperatura ambiental que influye de manera conocida en la medición, etc. El error sistemático se puede estimar mediante:

$$\xi_s = \frac{\sum_{i=1}^{n \to \infty} (x_i - X)}{n} \qquad con \qquad X = \text{valor verdadero}$$

Error aleatorio. Es la diferencia entre el valor medido y la medida de un determinado número de mediciones del mismo objeto, llevado a cabo en las mismas condiciones. El error aleatorio es único y no puede ser duplicado ya que las condiciones de medición no pueden ser duplicadas exactamente.

El **error aleatorio** es una variable aleatoria cuyo valor esperado es cero y cuya varianza es constante y puede estimarse como:

$$\varepsilon_i = x_i - \overline{x} \qquad con \qquad \underset{n \to \infty}{\overline{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

Otras diferencias entre estos dos tipos de errores son:

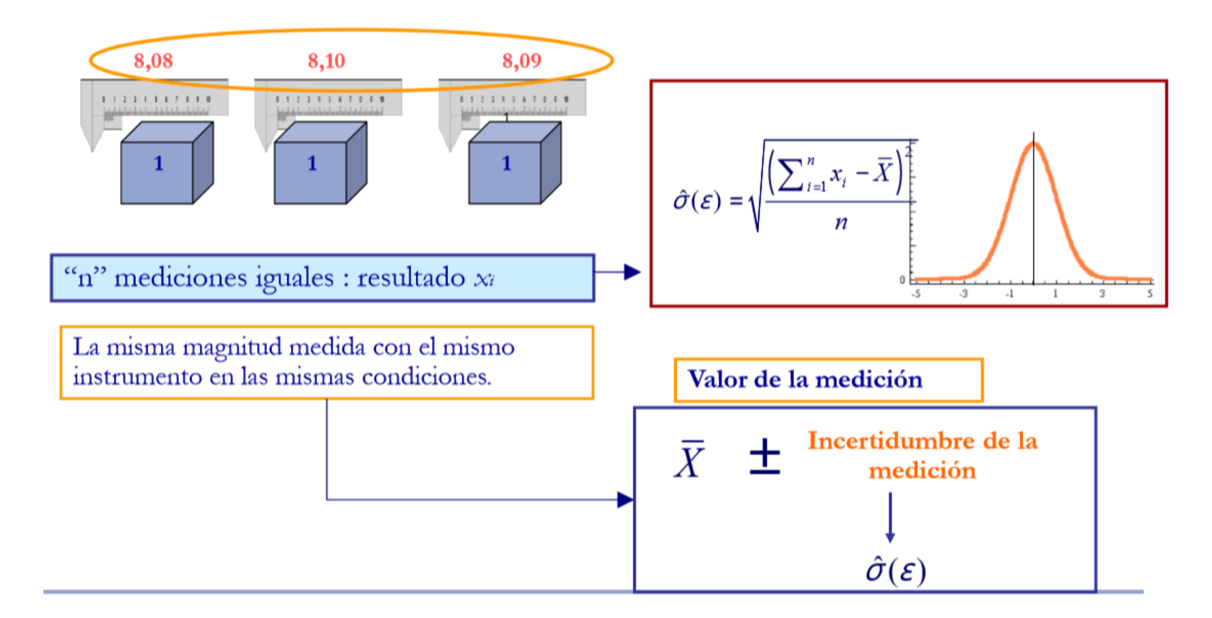
- El error aleatorio es la diferencia entre un valor y otro.
- El error sistemático es la diferencia entre el error y el promedio de errores.
- El error sistemático se puede compensar.
- El error aleatorio no se puede compensar.
- El error aleatorio se puede identificar realizando mediciones repetidas de la misma cantidad en las mismas condiciones.
- El error sistemático se puede valorizar comparando el resultado obtenido con la medición de la misma cantidad, realizada con un método diferente, o utilizando un instrumento de medición más exacto.

[26] Restrepo, Jaime
[27] Universidad Carlos III de Madrid

Incertidumbre de una medición

Por lo tanto, no es posible conocer el valor exacto del error de la medición. Es posible estimar su varianza o su desviación típica. Al medir una magnitud, el valor medido lleva asociado una **incertidumbre**.

Por ejemplo, el error debido a la repetibilidad (aleatorio) puede estimarse:[28]



Entonces, cualquier proceso de medida resulta imperfecto, es decir, siempre que se realice la medida de alguna magnitud se estará cometiendo cierto error debido a varias fuentes de incertidumbre (condiciones ambientales, errores de lectura, precisión y sensibilidad del instrumento, destreza del operario, errores de forma o deformación de la pieza a medir etc.).

Por lo tanto, si se mide el valor de una magnitud M, con el instrumento de medida correspondiente, el resultado de la misma se expresa de la forma:

M = X (promedio de mediciones realizadas) ± U (incertidumbre, cuantificada como la desviación estándar de las mediciones realizadas)

Por otro lado, la calidad de una medida está relacionada con el concepto de "incertidumbre" y las magnitudes significativas de los productos con las "tolerancias de fabricación". Asimismo, cuanto más estrictas sean las tolerancias de fabricación, se requerirán mayores precisiones de medida para la comprobación del cumplimiento de dichas especificaciones.

Finalmente, la ***Regla del 10*** nos dice que un instrumento de medición debe ser 10 veces más exacto que las tolerancias dimensionales de la parte que se mide.

En medidas dimensionales se suele considerar como admisible:

$$3 <= (T / 2U) <= 10$$

Donde T es la tolerancia y U es la incertidumbre.

[28] Universidad Carlos III de Madrid

Diferencia entre "exactitud" y "precisión"[29]

Aunque en el lenguaje de calle, ambos términos son sinónimos, sin embargo, metrológicamente, los términos exactitud y precisión, aunque relacionados entre sí, no deben intercambiarse, ya que la diferencia entre ambos es significativa.

Exactitud: Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero del mensurando.

Precisión: Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares bajo condiciones especificadas. Las "condiciones especificadas" pueden ser condiciones de repetibilidad, condiciones de precisión intermedia, o condiciones de reproducibilidad (norma ISO 5725-3:1994).

Así pues, el concepto de **exactitud se refiere a la capacidad de obtener valores o indicaciones próximas al valor verdadero de la magnitud medida**.

Por tanto, una medición, o el resultado, será más exacto cuanto más pequeño sea el error sistemático de medida; es decir, cuanto menor sea la diferencia entre el valor medio de los sucesivos resultados obtenidos y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud.

Sin embargo, **la idea de precisión refleja la capacidad de obtener valores o indicaciones próximas entre sí al efectuar mediciones repetidas**.

Una medición, o el resultado, será pues más preciso cuanto menor sea la dispersión que presentan entre sí los sucesivos resultados obtenidos.

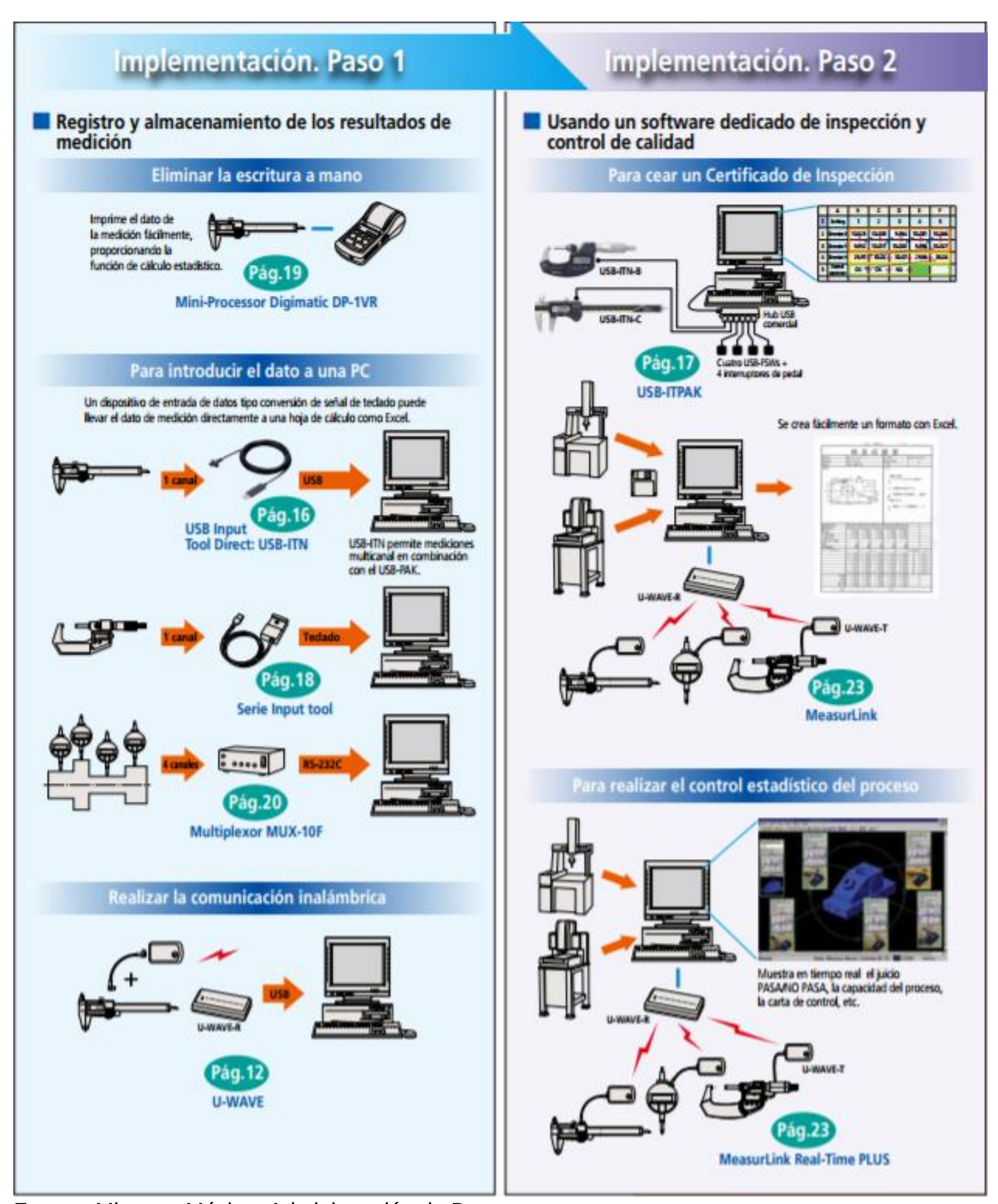
Se deduce que el resultado de una medición, o un instrumento, puede ser:

1. Exacto y preciso
Resultados muy próximos entre sí, con un valor medio muy cercano al valor verdadero.
2. Exacto, pero no preciso
Valor medio muy cercano al valor verdadero, pero gran dispersión de los resultados en torno al valor medio.
3. Preciso, pero no exacto
Resultados muy próximos entre sí, pero valor medio alejado del valor verdadero.
4. Ni preciso ni exacto
Gran dispersión de los resultados en torno al valor medio y valor medio alejado del valor verdadero.

[29] Centro Español de Metrología (CEM), 2011

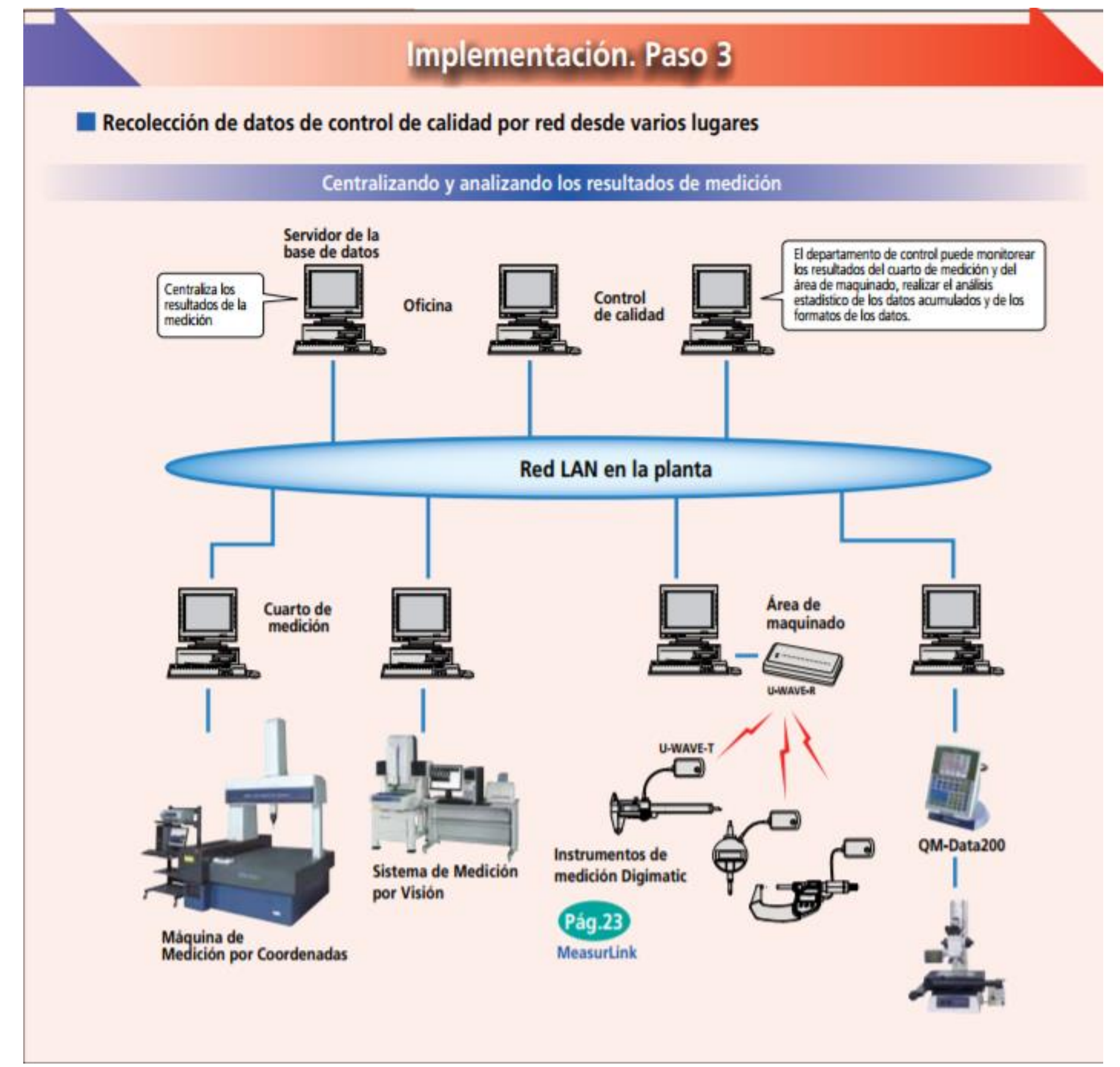
Ejemplo del diseño de un sistema de administración de datos de medición[30]

A continuación, se muestran los pasos a seguir para la implementación de un sistema en donde los resultados de medición de varios instrumentos de medición se almacenan y se integran como un sistema de información de calidad.



Fuente: Mitutoyo México, Administración de Datos

[30] Mitutoyo México, Administración de Datos

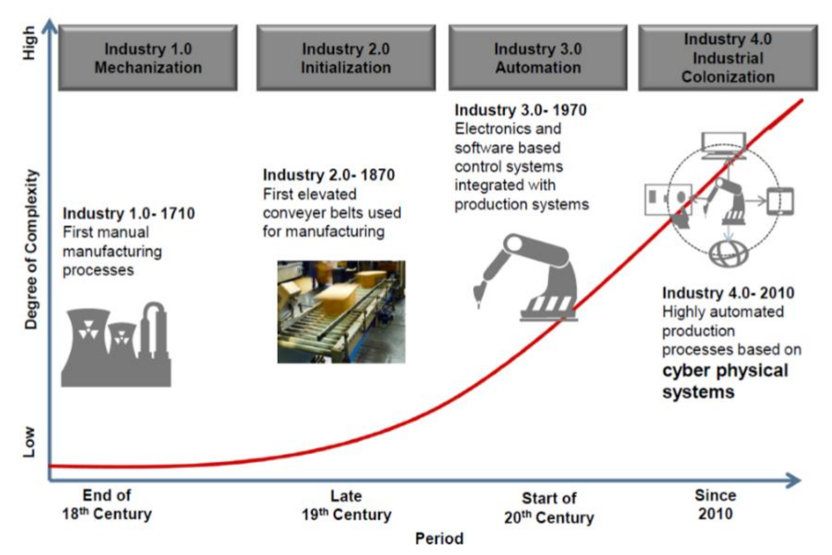


Fuente: Mitutoyo México, Administración de Datos

EL ROL DE LA METROLOGÍA EN LA INDUSTRÍA 4.0

En la siguiente figura, se muestra cómo ha ido evolucionando sucesivamente en el tiempo la Revolución Industrial iniciada en el siglo XVIII con la generación del vapor, produciéndose el primer telar mecánico. Luego, a partir de 1870 con la energía eléctrica, se inicia también la producción en cadena, así en 1908 Henry Ford inicia la primera cadena de montaje de automóviles. Después, a partir de 1970 hay un mayor nivel de automatización, se desarrolla la electrónica y las tecnologías de información. Finalmente, a partir del 2010 llega la Industria 4.0, con sistemas ciber-físicos, industria y productos inteligentes, internet de las cosas, hiperconectividad y big data[31]. Además, el aseguramiento de la calidad evoluciona a una calidad total y descentralizada de todos los procesos productivos y procesos de la organización.

[31] "La big data es un término que hace referencia a conjuntos de datos tan grandes y complejos como para que hagan falta aplicaciones informáticas no tradicionales de procesamiento de datos para tratarlos adecuadamente" (Wikipedia).



Las cuatro etapas de la revolución industrial[32]

El Dr. Detlef Schülke, señalaba que la Fábrica Inteligente (Smart Factory) entregará más rápidamente, mejores productos y productos más baratos. Estas fábricas surgen de la llamada **cuarta revolución industrial**, que ha dado lugar a la **Industria 4.0**. Esta "derivada de una evolución tecnológica propiciada por el desarrollo de los sistemas embebidos[33], su conectividad y la correspondiente convergencia del mundo físico y virtual. Todo esto proporciona unas capacidades de integración de objetos, información y personas que puede propiciar un salto cualitativo en la producción y uso de bienes y servicios"[34] "La medición tal y como la entendemos ahora, off-line y en laboratorio, se dedicará básicamente al análisis de problemas o a las pruebas de contrastación de especificaciones entre cliente y proveedor. El futuro se encuentra en la medición directa en los procesos y, conforme el coste de medir disminuya, se tendrá a comprobar las características fundamentales del producto al 100%, guardando registro de los resultados"[35] Otros retos para la metrología es la metrología en tiempo real, tecnología holística y multisensor, desarrollo de lenguajes y plataformas para el intercambio de información, el desarrollo de software de carácter integrador y multidisciplinar, big data, educación y trazabilidad para la metrología intensamente computacional.[36]



Metrología para el control predictivo de los procesos de fabricación[37]

[32] Asociación Española para la Calidad
[33] "Un sistema embebido es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas, frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real" (Wikipedia)
[34] Asociación Española para la Calidad
[35] Idem
[36] Idem
[37] Mutilba, Unai

3. MATERIALES POR UTILIZAR

Láminas triangulares de vinílico, cada una con dos agujeros.
Diversas piezas metálicas en tamaño y geometría.

4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EPP

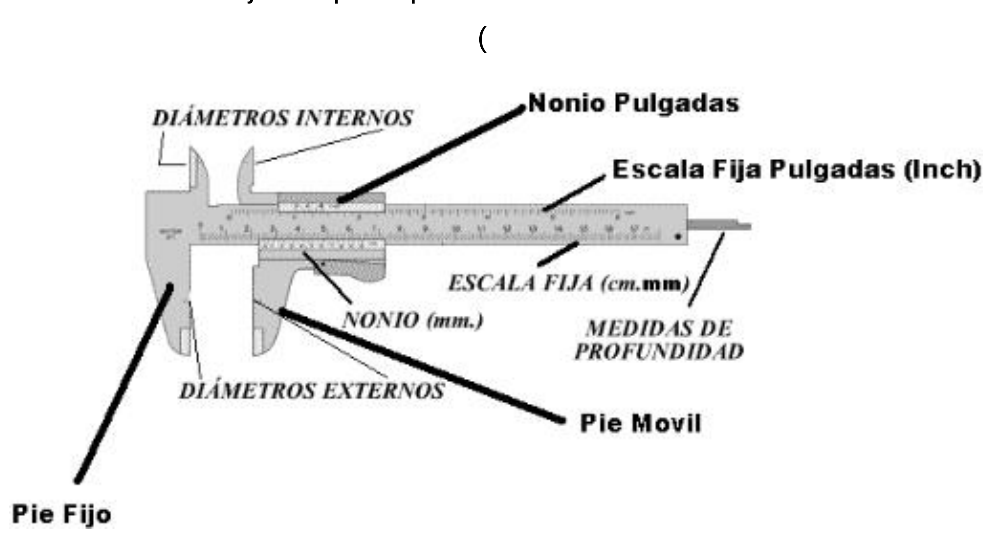
- Vernier
- Micrómetro exterior
- Goniómetro
- Regla metálica graduada
- EPP: mandil, zapatos de seguridad, lentes de seguridad, protectores auditivos, guantes de badana.

5. PROCEDIMIENTO MEDICIÓN DE INSTRUMENTOS MANUALES

a) Uso del vernier (escala en fracciones de pulgadas)

- Verificar que el instrumento cuando está completamente cerrado indique CERO.
- Asegurarse que el objeto o pieza que se va a medir esté limpio y no tenga defectos o rebabas en los bordes.
- Abrir la mandíbula móvil y colocar las puntas de medición en ambos lados de la pieza a medir. Presione las puntas de medición firmemente contra la pieza a medir.
- Bloquee el tornillo de sujeción para que la mandíbula no se mueva.

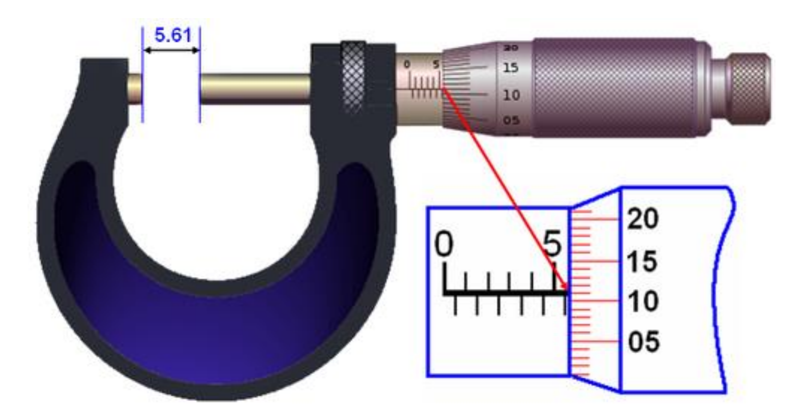
(



- En la escala fija (fracciones de pulgadas), hay un pequeño CERO. Mire la línea de división en la escala de vernier y cuente cuantas divisiones en 1/16 avos de fracciones de pulgadas han pasado la escala de la regla fija. Esto representa cuantos 1/16 avos de pulgada hay en esa pieza.
- En la escala (nonio pulgadas) observar cuantas divisiones pequeñas sobrepasan el CERO. Esto representa cuantos 1/128 avos de pulgada hay en esa pieza.
- Finalmente, se suma los 1/16 avos de pulgada con los 1/128 avos de pulgada que darán la lectura de la medición.

b) Uso del micrómetro exterior

- El primer paso es colocar firmemente la pieza a medir entre el tope y la espiga.
- Después se hace girar el tambor móvil lo suficiente para que la pieza quede fija dentro del micrómetro. Se realiza la fijación final con el rach o perilla de ajuste rápido para garantizar que todas las medidas se realizan con la misma presión y luego, se ajusta el bloqueador de la espiga para que no se mueva la pieza.
- Primero, se observa la lectura del tambor fijo para determinar la medida en milímetros. Hay dos escalas una superior y otra inferior. Cada división en la escala superior representa 1,0 mm y en la escala inferior representa 0,5 mm.
- Luego, se ve la escala que coincide del tambor fijo con la escala del tambor móvil para hallar las centésimas, en donde cada división representa 0,01 mm.
- Al finalizar la medición se suman las medidas obtenidas (tambor fijo y tambor móvil) para obtener la medida final de la pieza. Como se muestra en la figura.



Lectura de un micrómetro exterior

c) Uso del goniómetro

- Primero, se fija el instrumento en el objeto de medición asegurándose de que su inclinación coincida con el ángulo del objeto a medir y luego, se ajusta la rueda de bloqueo para evitar que la medida se altere por algún movimiento.



Luego se procede a observar la graduación con la que cuenta el goniómetro en grados y la línea del nonius del goniómetro que coincide con la escala fija en grados. Cada línea del nonius representa 60/12 = 5 minutos.

- Finalmente se da la lectura sumando los grados más los minutos.

6. REGISTRO DE DATOS Y RESULTADOS

Utilizando los instrumentos, equipos y materiales indicados, cada subgrupo realizará las mediciones que se solicitan en (a), (b) y (c) y los resultados se adjuntarán al informe.

a) Mediciones de triángulos

Cada subgrupo elegirá (1) triángulo, realizará las mediciones y completará los datos y resultados en las respectivas tablas. Además, dibuje cada triángulo con sus dimensiones.

i. Lados y ángulos (usar vernier y goniómetro)

	# de medición	**Lado (mm)**			**Ángulo (° ‘)**		
		a	**b**	**c**	**A**	**B**	**C**
TRIÁNGULO #	**1**						
	2						
	3						
	4						

	5						
	Promedio (Prom)						
	Desviación estándar (Desv)						
	Medición (Prom ± Desv)						

	# de medición	**Lado (mm)**			**Ángulo (° ‘)**		
		a	**b**	**c**	**A**	**B**	**C**
TRIÁNGULO #	**1**						
	2						
	3						
	4						
	5						
	Promedio (Prom)						
	Desviación estándar (Desv)						
	Medición (Prom ± Desv)						

ii. Espesor (usar micrómetro)

# de medición	**Espesor (mm)**	
	Triángulo #	**Triángulo #**
1		
2		

3		
4		
5		
Promedio (Prom)		
Desviación estándar (Desv)		
Medición (Prom ± Desv)		

iii. Distancia entre centros agujeros (usar vernier)

# de medición	**Distancia entre centros agujeros circunferencias (mm)**	
	Triángulo #	**Triángulo #**
1		
2		
3		
4		
5		
Promedio (Prom)		
Desviación estándar (Desv)		
Medición (Prom ± Desv)		

b) Verificar tolerancias y dibujar eje escalonado (usar micrómetro)

Cada subgrupo medirá los diámetros del eje escalonado y completará el siguiente cuadro. La tolerancia exigida es de ± 0,25 mm. Además, se solicita un dibujo con todas sus dimensiones.

Parte	**Dimensión (mm)**	**Rango especifación**	**Medición # 1 (mm)**	**Medición # 2 (mm)**	**Medición # 3 (mm)**	**Promedio (mm)**	**Desviación estándar**
Cilindro 1 (diámetro)							
Cilindro 2							

(diámetro**)**							
Cilindro 3 (diámetro)							
Cilindro 4 (diámetro)							
Cilindro 5 (diámetro)							
Cono (base 1)							
Cono (base 2)							
Cono (altura)							

Con los datos del cuadro anterior, calcular el rango de medición y comprobar si los diámetros del eje escalonado cumplen o no con las tolerancias exigidas.

Parte	Rango medición	Rango especificación	Cumple SI / NO
Cilindro 1 (diámetro)			
Cilindro 2 (diámetro**)**			
Cilindro 3 (diámetro)			
Cilindro 4 (diámetro)			
Cilindro 5 (diámetro)			
Cono (base 1)			
Cono (base 2)			
Cono (altura)			

c) Dimensionar y dibujar tornillo templador (usar vernier y micrómetro)

Cada subgrupo dimensionará todas las partes del tornillo templador. Se hará 3 mediciones, luego se obtendrá el promedio y rango de mediciones de cada una de ellas. Finalmente, hacer un dibujo del tornillo templador y colocar todas sus dimensiones.

Parte	Medición # 1 (mm)	Medición # 2 (mm)	Medición # 3 (mm)	Promedio (mm)	Desviación estándar	Rango medición
Sobre cabeza (ancho)						

Sobre cabeza (largo)						
Sobre cabeza (espesor)						
Cabeza tornillo (diámetro)						
Cabeza tornillo (espesor)						
Rosca (diámetro)						
Vástago (largo)						

d) Observaciones mediciones realizadas

Cada subgrupo deberá completar y anotar todos los errores que se han producido durante las mediciones realizadas con cada instrumento en el siguiente cuadro.

Medición	Errores
Triángulos	
Eje escalonado y tornillo templador	

7. PREGUNTAS

a) Definir los siguientes términos (colocar fuente y pie de página).

Calibración: ____

____

Incertidumbre: ____

____

Magnitud: ____

____

Mensurando: ____

____

Patrón internacional: ____

____

Patrón primario: ____

____

Patrón de referencia: ____

____

Patrón de trabajo: ____

____

Repetibilidad: ____

____

Resolución: ____

____

Tolerancia dimensional: ____

____

Trazabilidad metrológica: ____

____

Unidad de medida: ____

____

b) Indicar en la siguiente tabla, los rangos de operación y las resoluciones para cada uno de los instrumentos de medición que se utilizaron en la práctica.

Instrumento	Rango de medición (unidades)	Resolución (unidades)
Goniómetro		

Micrómetro		
Regla de acero		
Vernier		

c) Ingresar a la Dirección de Metrología del INACAL (ver enlace en Bibliografía) y completar las siguientes tablas.

Patrón nacional de	**Características**			**Secuencia de trazabilidad**		
	Denominación	**Valor nominal**	**Material**	**Patrón Internacional**	**Patrón Nacional**	**Patrón de referencia**
Masa						

Patrones nacionales de	**Definición del Kelvin en el SI**	**Nombre de la Escala Internacional de Temperatura de 1990**	**Patrones Nacionales de Temperatura (Puntos Fijos)**			
Temperatura						

d) **VIDEO:** Verificación dimensional de una pieza mediante una máquina de coordenadas (MMC). Ingrese al siguiente link, vea el video y responda las preguntas.
https://www.youtube.com/watch?v=xp4TxmLk3-0

i. Redacte brevemente el procedimiento realizado para la verificación dimensional de una placa mecanizada utilizando una MMC.

ii. Mediante un diagrama DOP explique el procedimiento anteriormente descrito.

e) **VIDEO:** Sistema de medición en línea y a tiempo mediante la medición de producción automotriz 360° SIMS. Ingrese al siguiente link, vea el video y responda las preguntas.
https://www.youtube.com/watch?v=bDej1JE6knU

i. Describa brevemente en que consiste la medición de producción automotriz con 360° SIMS.

ii. Mediante un diagrama DOP explique el procedimiento anteriormente descrito.

8. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

- Asistencia, puntualidad y participación,
- Evaluación oral e individual.
- Informe grupal con respuesta al cuestionario de preguntas.

9 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, Jorge y BASTIDA, Karina
2006 "Calibración en longitud de onda de un láser estabilizado de He-Ne". Anales AFA, volumen 18, número 1, junio 2006.
https://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/363

Centro Español de Metrología (CEM)
2012 VIM. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3ra. Edición en español. Centro Español de Metrología.
http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf

2011 ¿Hay alguna diferencia entre "exactitud" y "precisión"? Preguntas frecuentes. Centro Español de Metrología.
http://www.cem.es/preguntas_frecuentes/%C2%BFhay-alguna-diferencia-entre-exactitud-y-precisi%C3%B3n

2018 El Sistema Internacional de Unidades, SI
https://www.cem.es/content/el-sistema-internacional-de-unidades-si

COBAN ENGINEERING
s/f "Lectura geométrica Scotación y Tolerancia".
http://www.cobanengineering.com/Dimensiones_y_Tolerancias_Geometricas/Lectura_Tolerancias_Geometricas.asp

ESCAMILLA, Adolfo
2009 *Metrología y sus aplicaciones.* Primera Reimpresión, 2013. México, D.F.: Grupo Editorial Patria.

FRANCO, ÁNGEL
2013 "Unidades y medidas". Curso Interactivo de Física en Internet del Profesor Ángel Franco. Profesor de Fundamentos Físicos de la Ingeniería y de un Curso de Lenguaje de Java - Departamento de Física Aplicada I - Universidad del País Vasco.
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/unidades/unidades/unidades_1.html

GÓMEZ, Jorge y otros
2002 "Dimensionado y tolerado geométrico en las normas técnicas colombianas". Dyna, volumen 69, número 137, noviembre 2002, pp. 35-44.
http://www.redalyc.org/pdf/496/49613704.pdf

GROOVER, Mikell P.
2007 *Fundamentos de manufactura moderna materiales, procesos y sistemas.* México, D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana.
(670.51 GROO 2007)

INACAL
s/f "Dirección de Metrología (INACAL – DM)". Brochure de la Dirección de Metrología.
https://www.inacal.gob.pe/metrologia/categoria/presentacion

2015 Decreto Supremo N° 004-2015-PRODUCE – Aprueban Reglamento de Organización y Funciones del Instituto Nacional de Calidad – INACAL. Lima, 23 de febrero.
https://www.inacal.gob.pe/metrologia/categoria/mlegal

s/f "Patrón Nacional de Masa – Pesa Patrón Cilíndrica de Acero Inoxidable". Brochure DM-PN-LM-KP1.
http://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/patronesnacionales/files/DM-PN-LM-KP1.pdf

INGEMECÁNICA
2018 "Sistema Internacional de Unidades (S.I.)".
(http://ingemecanica.com/tutoriales/unidadesdemedida.html).

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven
2014 *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* Dos volúmenes. Séptima Edición. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.
(670.42 KALP 2014)

MITUTOYO MÉXICO
2010 "Redondez (equipos de medición de forma)". Boletín Técnico, N° 10, julio 2010.http://www.mitutoyo.com.mx/Descargas/Boletines/BOLETIN%20JULIO%202010.pdf

s/ f "Administración de Datos de Medición".
http://www.mitutoyo.com.mx/Catalogo%20Digital/catalogo_secciones/administracion/files/02_data%20administration.pdf

MORO, María
2017 *Fundamentos de Metrología Dimensional.* España: Marcombo S.A.

MUÑOZ, Rafael
2011 "Tema 5. Magnitudes objeto de la metrología dimensional". Curso Introducción a la Metrología. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII). Universidad Politécnica de Madrid.
http://faii.etsii.upm.es/dfaii/Docencia/Libre%20eleccion/Material%20Docente%20Libre%20Eleccion/Introduccion%20a%20la%20Metrologia/TEMA%205.%20Magnitudes%20objeto%20de%20la%20metrolog%C3%ADa%20dimensional.pdf

2011 "Tema 10. Determinación de los defectos de forma". Curso Introducción a la Metrología. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII). Universidad Politécnica de Madrid.
http://faii.etsii.upm.es/dfaii/Docencia/Libre%20eleccion/Material%20Docente%20Libre%20Eleccion/Introduccion%20a%20la%20Metrologia/TEMA%2010.%20Determinaci%C3%B3n%20de%20los%20defectos%20de%20forma.pdf

RESTREPO, Jaime
2016 *Metrología.* Bogotá: Lemoine Editores.

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
s/f "Capitulo 3: Metrología y Calidad. Tema 6: Metrología. Sistemas y técnicas de medida para el control de calidad". En Curso Sistemas de Producción y Fabricación. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.
http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/sistemas-de-produccion-y-fabricacion/material-de-clase-1/tema-6

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
2010 OpenCourseWare. Ingeniería y Arquitectura. Ingeniería Gráfica. Tipos de Tolerancias Geométricas.
http://ocw.unican.es/ensenanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/4.3%20Tipos%20de%20Tolerancias%20Geometricas.pdf

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO
s/f "TEMA 15: Introducción a la Metrología Dimensional". En Curso de Tecnología Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco.
http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/741_ca.pdf.

s/f "TEMA 19: Medición de dimensiones y formas". En Curso de Tecnologías de Fabricación. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco.
http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/1023_ca.pdf.

s/f "TEMA 17: Metrología del acabado superficial". En Curso de Tecnología Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco.
http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf.

Links de interés

- **Metrología**

CENAMINFORMATICA
2010 Video institucional del CENAM. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=NwCID5GtVKo).

DOSAL, María Antonia
2007 Cifras significativas.
(http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Cifras_significativas_31127.pdf).

EDUARDO J. STEFANELLI
(https://www.stefanelli.eng.br/es/)

- **Uso del vernier**

KALEB3DD2
2012 Como usar un calibrador, pie de rey o vernier. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=w0ZqmKN_KCw).

2012 Como usar un calibrador, pie de rey o vernier 2. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=W1nJR7jmbCA).

SENATI CANAL PERU
2012 El Calibrador (Mediciones Industriales). Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=aaTHhHy27TY).

- **Uso del micrómetro**

CORONA, Luis
2013 Como leer un micrómetro en milímetros. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=ATXOwIYp7c4).

NINOGHG
2008 Micrómetro o palmer. (https://www.youtube.com/watch?v=FjGV6ve-Nxg).

SENATI CANAL PERU
2012 El Micrómetro (Mediciones Industriales). Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=I_mGkDAJ3NQ).

- **Uso del goniómetro**

CORONA, Luis
2014 Goniómetro en minutos, simulador en línea. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=98WX3bXJ2gc).

SENATI CANAL PERU
2012 El Goniómetro (Mediciones Industriales). Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=rXxwWWMAeDM).

VIDEOSIMH ERABILTZAILEAREN KANALA
2012 Medición con Goniómetro. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=LsYDj6LRuaU).

- **Uso del reloj comparador**

SENATI CANAL PERU
2012 El Reloj comparador (Mediciones Industriales). Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=JpHm6uNfR14)

- **Uso del alesómetro**

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CAPACITACIÓN AUTOMOTRIZ
2014 Ovalización y conicidad del cilindro. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=_kkJ-DTM9Po)

- **Aplicaciones mediciones dimensionales con instrumentos convencionales**

THEGALLEGO8
2013 Verificación de pistón y bielas. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=k12-IM_QFBM)

- **Máquinas y equipos de metrología dimensional**

CANALHIRITUBE
2012 Hirutube – Cómo medir piezas mediante metrología dimensional.
Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=GE36W7WU0VY).

CENAMINFORMATICA
2010 Medición por coordenadas. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=02NpAl1Ddt8).

GIRALDO, W.
2011 Video Máquina MMC.AVI. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=xp4TxmLk3-0

I3 OFICIAL
2016 Medición sin contacto con sensor láser ZX1. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=SlgPR8z5Rds)

INSEMAC
2016 Medidor Stone Laser 3D. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=bBN8cMycWxU)

LOGISMARKETES
2016 Escáner 3D para plantas industriales y líneas de montaje. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=Vb-CyZW_JC4).

REVISTA METALMECÁNICA INTERNACIONAL
2014 Presentación de Mitutoyo en Mecánica 2014. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=HcRaIN_uxWc).

TECSOL3D
2012 TecSold3D MetraScan – Escáner 3D Metrología en México. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=4WtdNYaWBqk).

TRIDIMENSIONAL HEXAGON
2015 Guía rápida de medición tridimensional mediante máquina Tridimensional Hexagon Microval PFX 454. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=uhpYvI4PxeU).

UKMETROLOGIST
2013 Gear inspection using a Coordinate Measuring Machine. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=844UiRBVxlY).

- **Equipos portátiles de medición por coordenadas (MMC)**

FAROSpain
2012 Brazo de medición FARO Gage -Sistema de medición 3D portátil de alta precision para piezas pequeñas. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=R8ccmBC8A6c

FAROSpain
2012 FARO Laser Tracker Vantage: EL MMC portátil de extrema precision. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=BtODgfedbh8

- **Inspección robótica e inspección dimensional no destructiva**

BCN VISION – VISIÓN ARTIFICIAL
2016 Control dimensional de botellas de vidrio. Videograbación.
(https://www.youtube.com/watch?v=GW4-dwu2cU4)

HEXAGON
2016 A New Dimension in Measurement: industrial X-ray and computed tomography (CT) Scanning in Dimensional Metrology (TV711). Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=3aaqyDUJGwI

INFAIMON VISIÓN ARTIFICIAL
2014 Inspección robótica 3D de bloques de motor mediante visión artificial. Videograbación. (https://www.youtube.com/watch?v=7sAbVtZAZSI).

Mesurex
2018 sensores +de triangulación láser. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=rxefLL4if3s

2013 Sensores de distancia por triangulación láser de Micro-Epsilón. Principio de funcionamiento. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=USBk-rG1IyE

YXLON International
2016 YXLON CT Metrology. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=KvUul8t4XaE

ZEISS Industrial Metrology US
2017 ZEISS Computed Tomography, solutions in the plastics industry. Videograbación.
https://www.youtube.com/watch?v=SW2WRO6OQjU

- **Metrología en la Industria 4.0**

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD
s/f "El papel de la metrología en la industria 4.0".
https://www.aec.es/c/document_library/get_file?p_l_id=5061832&folderId=5060877&name=DLFE-24113.pdf

DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS
2019 "Metrología en la era de la industria 4.0"
https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/metrologia-en-la-era-de-la-industria-4-0

MUTILBA, Unai y KORTABERRIA, Gorka
2016 "El Rol de la metrología en la industria 4.0" e-medida Revista Española de Metrología, número 11, diciembre 2016.
https://www.e-medida.es/numero-11/el-rol-de-la-metrologia-en-la-industria-4-0/